

文丘里管在棉籽油预处理中的结构设计与应用

黄群,刘昭明,程谦伟,覃日珍,孟陆丽,黄翠姬

(广西科技大学 生物与化学工程学院,广西 柳州 545006)

摘要:基于 FLUENT 软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,以棉籽油为介质,对文丘里管内空化流场进行数值模拟,计算文丘里管内空化区的空化数和汽含率分布,研究文丘里管的结构参数变化对空化效果的影响。结果表明,文丘里管的结构对空化效果有着明显的影响,空化效应随着入口锥角的增大、喉部长度的减小而增强,喉部直径与出口锥角对空化效应的影响存在最适值,为文丘里管在油脂中应用时的结构优化设计提供了依据。同时通过棉籽油水力空化验证实验发现,水力空化对棉籽油中的棉酚脱除有非常明显的效果,且脱除率随着文丘里管入口锥角的增大而提高,即空化效应越强脱除率越高,与模拟结果相一致。

关键词:文丘里管;水力空化;空化数;汽含率;棉酚

中图分类号:TS 225.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2016)04-0042-05

Structural design and application of Venturi tube in cottonseed oil preprocessing

HUANG Qun, LIU Zhao-ming, CHENG Qian-wei, QIN Ri-zhen, MENG Lu-li, HUANG Cui-ji
(College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology,
Liuzhou Guangxi 545006)

Abstract: Based on the computational fluid dynamics software FLUENT, using the standard $k-\varepsilon$ model, with the cottonseed oil as medium, the numerical simulations of the cavitation flow fields in Venturi tubes were established. The cavitation number and the distribution of gas-holdup of the cavitation region in the Venturi tubes were computed. The effect of the structure of Venturi tubes on cavitation was researched. The results showed that the structure of Venturi tubes had an obvious effect on the cavitation, the cavitation effect enhanced along with the increase of inlet angle and decrease of the laryngeal length, and the diameter of laryngeal and outlet angle had the best value on the cavitation effect, which provided a support for optimizing the design of the structure of Venturi tubes applied in oils. At the same time, it was found by the verification experiment of the hydrodynamic cavitation of cottonseed oil that the hydrodynamic cavitation had a significant effect on the removing of gossypol, and the removal rate increased along with the increase of inlet angle of the Venturi tube, which indicated that the stronger the cavitation effect was, the higher the removal rate was. The results obtained by the experiments were similar to those by numerical simulation.

Key words: Venturi tube; hydrodynamic cavitation; cavitation number; gas-holdup; gossypol

空化是一种微观、瞬时、随机、多相的复杂现象^[1]。它是由于流体经过节流元件时,由于元件对

流体的阻碍作用,流体流速变大,压力减小,当液体中局部压力低于相应温度时的饱和蒸气压而出现的空泡生成、长大及溃灭的流体动力学现象^[2]。空化发生时可形成局部高温、高压,并能形成强烈的冲击波和微射流,是潜在的巨大能量。目前,国内外许多学者都对水力空化现象进行了大量的理论分析和实

收稿日期:2016-01-06

基金项目:广西高校大学生创新创业计划项目(201200602033)

作者简介:黄群,1991年出生,女,硕士研究生。

通讯作者:程谦伟,1979年出生,男,副教授。

验研究,例如 Rayleigh^[3]最早对空化现象进行理论研究,建立了理想球形空泡的运动方程式,奠定了空泡动力学的发展基础。20世纪70年代初,Knapp 和 Raily 等对空泡的产生、发展、溃灭机理作了大量研究,形成了较为完整的理论^[4]。王智勇等^[5]对三种不同几何形状的文丘里管内空化流场进行了数值模拟,计算了文丘里管内空化区的空化数、汽含率,研究了文丘里管结构形式对空化效果的影响。庄水田^[6]围绕文丘里管采用数值模拟优化其结构参数,并通过水力空化实验降解若丹明 B 对模拟计算结果进行了验证。目前,将水力空化应用于实际生产生活中亦非常广泛,如将水力空化应用于降解水中有机污染物^[7-8]、液态食品杀菌^[9-10]、物料混合^[11-12]、工业设备防除垢^[13-14]、强化化工反应过程^[15-17]等各方面。

文丘里管是水力空化发生器之一,由于其结构简单、坚固耐用等优点,被广泛地用来模拟研究空化问题。但是,目前对于文丘里管的空化研究多以水为介质,优化水力空化发生器的结构,用油做介质的比较少。本文基于计算流体力学软件 FLUENT 6.3,研究将水力空化技术应用于棉籽油预处理,以棉籽油为介质,对文丘里管空化装置的流场特性进行了数值模拟,设计了文丘里管空化装置,并将其应用于棉籽油中棉酚的脱除实验,实验结果发现水力空化对棉酚有明显的脱除作用,且脱除效果随空化强度的增加而增加。

1 文丘里管结构与数值模拟分析

1.1 理论基础

文中研究的文丘里管内的油脂流动可视为不可压缩的稳定流动,密度为常数。其基本控制方程由质量守恒方程和动量守恒方程等构成。

质量守恒方程: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, 式中 u 、 v 和 w 是速度矢量 u 在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x,$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y,$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z,$$

式中: p 为微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 等是分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的体力,若体力只有重力,且 z 轴竖直向上,则 $F_x = 0$ 、 $F_y = 0$ 、 $F_z = -\rho g$ 。

针对不同结构参数的文丘里管进行模拟计算,

通过空化流场的空化数和汽含率来表征空化流场的强度。空化数表征了流场中是否出现空化及空化的程度,是描述空化初生和空化状态的重要参数。可通过空化数来判别空化初生并衡量空化强度,描述设备对空化破坏的抵抗能力,衡量不同流场空化现象的相似性等。对于给定的流场,空化强度随空化数的增高而减弱,空化数越大,流场中越不容易发生空化,空化数越小空化效应越强烈^[5]。

$$C_v = \frac{P_1 - P_v}{\rho v_1^2 / 2}$$

公式中: C_v 表示空化数; P_1 指喉部压力,由 FLUENT 模拟计算得到; P_v 指棉籽油在模拟温度下的饱和蒸汽压; ρ 表示棉籽油的密度; v_1 指喉部中轴中点速度值,由 FLUENT 模拟计算得到。

汽含率表示液体中气体所占百分数,数值越大表示空化发生的程度越剧烈。

$$\alpha = \frac{V_g}{V_l + V_g} \times 100\%$$

公式中: α 表示汽含率, V_g 表示气体的体积, V_l 表示液体的体积。

1.2 建模与求解

为了考察本文所设计的文丘里管装置通过空化作用在棉籽油预处理过程中对棉酚进行脱除的可行性,采用流体力学软件 FLUENT 6.3,对文丘里管内部流场特性的变化进行了数值模拟。文丘里管空化器为轴对称形状,计算模型可简化为二维流动,模拟过程包括建立模型、确定边界条件、网格划分、求解方程。采用 Gambit 软件建立文丘里管结构模型,边界条件选用压力入口、压力出口,壁面无滑移,采用结构化网格进行划分,网格图如图 1 所示。默认压力基求解器,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和标准壁面函数法,压力速度耦合方式采用 SIMPLE 算法,压力选用 Standard 离散格式,其他均选用具有绝对稳定特性的一阶迎风格式,模拟时,计算区域内均采用表压值。通过改变文丘里管内各结构参数,模拟文丘里管内产生的空化场变化^[18-20]。考察了在入口压力为 0.5 MPa、出口压力为 0.1 MPa 的条件下空化流场中空化数及汽含率的变化情况,其中文丘里管内压力分布及两相汽含率分布如图 2 ~ 图 3 所示。

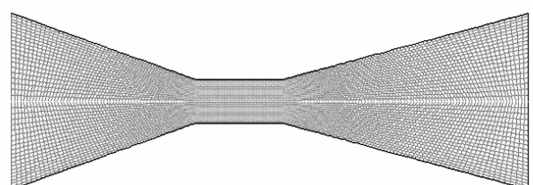


图1 空化装置文丘里管计算模型网格划分示意图

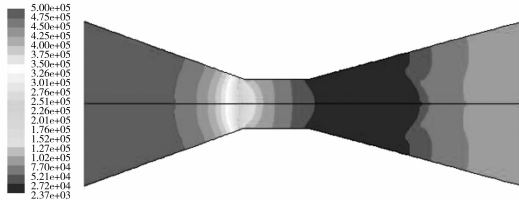


图 2 空化装置文丘里管压力分布图

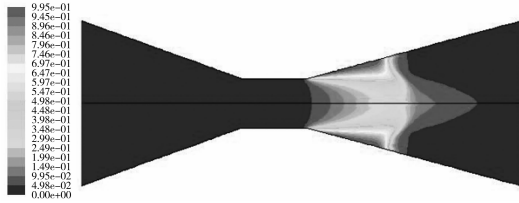


图 3 空化装置文丘里管内蒸汽体积分数分布图

1.3 文丘里管结构参数变化对空化效果的影响

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,模拟在温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,黏度 $\mu=0.0704\text{ Pa}\cdot\text{s}$,密度 $\rho=918\text{ kg}/\text{m}^3$,饱和蒸汽压 $P_v=1.41\text{ KPa}$,入口压力为 0.5 MPa ,出口压力为 0.1 MPa 的条件下,对入出口直径为 20 mm ,入口锥角、出口锥角变化范围 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}$,喉部直径为 $2\sim 10\text{ mm}$,喉部长度变化范围为 $2\sim 14\text{ mm}$ 的文丘里管中的空化流场进行模拟。从 FLUENT 模拟的结果得出空化器流体区域的压力分布图和速度分布图,从而得到流体区域内喉部中点的压力和速度的值,代入式中计算出空化数,并通过模拟结果中得出的文丘里管壁面两相体积分布数据,计算出文丘里管壁面汽含率的值,作出文丘里管各参数变化与空化数及汽含率的关系图。其中文丘里管结构参数的设置,参照了付勇^[21]、王常斌^[22]、张宁宁^[19]、庄水田^[6]等人对文丘里管内部空化流场进行模拟并优化文丘里管结构的研究。模拟的结果及分析如图 4~图 7 所示。

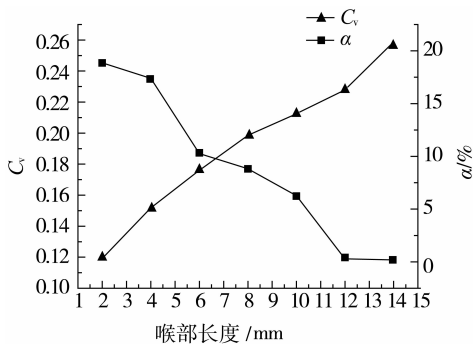


图 4 喉部长度与空化数、汽含率的关系

注:模拟条件为喉部直径 5 mm 、入口锥角 40° 、出口锥角 30° 、入口压力 0.5 MPa 、出口压力 0.1 MPa 。

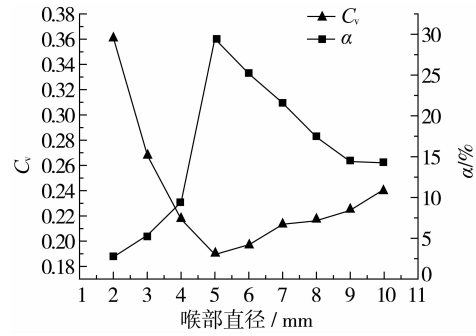


图 5 喉部直径与空化数、汽含率的关系

注:模拟条件为喉部长度 8 mm 、入口锥角 40° 、出口锥角 30° 、入口压力 0.5 MPa 、出口压力 0.1 MPa 。

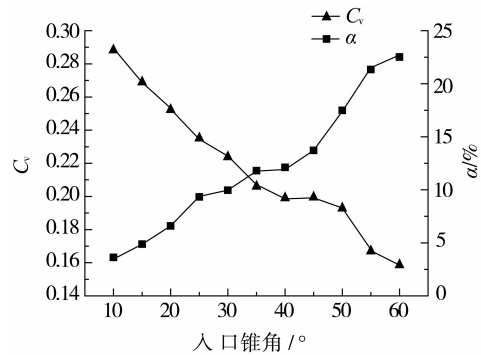


图 6 入口锥角与空化数、汽含率的关系

注:模拟条件为喉部直径 5 mm 、喉部长度 8 mm 、出口锥角 30° 、入口压力 0.5 MPa 、出口压力 0.1 MPa 。

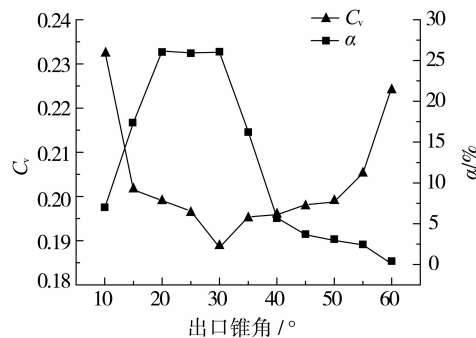


图 7 出口锥角与空化数、汽含率的关系

注:模拟条件为喉部直径 5 mm 、喉部长度 8 mm 、入口锥角 40° 、入口压力 0.5 MPa 、出口压力 0.1 MPa 。

由图 4 可知,在其他条件不变的情况下,随着文丘里管的喉部长度的减小,空化数减小,壁面汽含率增大,空化效应增强。这是由于喉部长度减小,喉部的收缩扩张加剧,压力变化急剧,空化更易产生。由图 5 可看出,当喉部直径为 5 mm 时空化数最低,汽含率最高,文丘里管内空化效应最强。因为随着喉部直径的增大,空化数先降低后增高,汽含率先升高后降低,空化效应相应地先增强后减弱,这是由于喉

部直径越大,压力恢复速度越快,空化泡破裂速度加快,空化产生受到抑制。因此,在其他条件不变的情况下,喉部直径越小越易于产生空化,空化效应越强烈。但喉部过小会使压力损失增大,因而喉部直径存在一最适值。由图6中的数据可知,入口锥角越大,空化数越小,汽含率越高,空化的效果越好。入口角度越大,汽化分布的区域越广,气泡数越多,空化数的减小可能是因为入口锥角的增大造成压力的降低,压力降低是导致空化数减小的主要因素。由图7中的数据分析可知,随着出口锥角的增大,空化数先逐渐降低,汽含率逐渐增大,在出口锥角30°时出现了空化数最低值和汽含率最高值,说明出口锥角30°时空化效果最好。因此,为增强文丘里管的空化效应,可以缩短文丘里管的喉部长度,增大入口锥角,适当缩小喉部直径并适当减小出口锥角。

2 空化作用在棉籽油预处理中的实验设计

2.1 水力空化处理棉籽油的实验装置

本文设计的水力空化处理棉籽油的实验装置如图8所示。该装置是一个闭合循环系统,主要由带冷凝水盘管的储液罐、齿轮油泵、控制阀、浮子流量计、压力表、文丘里管空化器组成。油样从储液罐下端被泵吸入并分支成主管路和旁通管路,通过调节旁通路上的V₂控制空化器的进口压力和主管路上的流量。

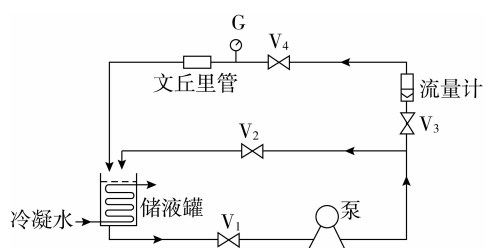


图8 水力空化装置设备图

注:V₁、V₂、V₃、V₄指控制阀,G指压力表。

2.2 棉籽油的水力空化实验

采用如图8所示的水力空化装置,将棉籽油置于储液罐中,启动泵并调节控制入口压力和流量的阀门V₂和V₃,使之达到合适压力。使循环冷凝水通过盘管,保持操作温度稳定。在水力空化作用下考察文丘里管入口锥角对棉籽油中棉酚含量的影响,研究空化作用对棉籽油中棉酚的脱除效果,并验证模拟结果。

棉酚含量的测定:在GB 5009.148—2014提供的高效液相色谱法的基础上稍作修改^[23-24]。仪器:

日立 L2000 高效液相色谱仪。色谱柱为 Phenomenex ODG-C18(4.6 mm × 150 mm, 5 μm)。色谱条件:流动相为甲醇:0.05% 磷酸 = 90:10,流速为 1.0 mL/min,柱温为 40 °C,检测波长为 235 nm,进样量为 10 μL。

称取空化处理好的油样,加入一定体积的无水乙醇,剧烈振摇 2 min,冰箱放置过夜,取上清液 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液过 0.22 μm 滤膜,即为试样液。棉酚标准样经 HPLC 检测后,得回归方程 $Y = 142\ 249.64X - 707\ 413.42$, $R^2 = 0.999\ 5$,线性范围为 5.15 ~ 103.00 μg/mL。根据标准曲线得出来的回归方程,计算出测定试样中棉酚的含量,并用于计算油样中棉酚的含量:

$$X_t = \frac{V \cdot c}{m}$$

式中: X_t 为水力空化处理 t 时间后试样中棉酚的含量, mg/kg; m 为试样质量, g; c 为测定试样中棉酚的含量, μg/mL; V 为所用无水乙醇的体积, mL。

本文中用棉酚含量的脱除率来判断水力空化对棉酚的脱除效果,脱除率为:

$$\eta = \frac{X_0 - X_t}{X_0} \times 100\%$$

式中: X_0 为未空化油样中棉酚的含量, mg/kg; η 为棉酚含量的脱除率。

3 水力空化在棉籽油棉酚脱除中的实验探究

通过 Fluent 数值模拟可知,文丘里管结构参数的变化是影响水力空化强度的重要因素,也是影响水力空化强度对棉籽油中棉酚脱除效果的重要因素。根据数值模拟结果,选取表1中的1~5号文丘里管,在初始温度为 30 °C、入口压力为 0.1 MPa 的条件下,取 600 mL 棉酚质量浓度为 114.93 mg/kg 的含棉酚棉籽油,在空化装置中循环处理 2 h,每隔 20 min 取样,依据 2.2 中提供的高效液相色谱法测定棉酚含量的变化,考察文丘里管入口锥角对棉酚脱除效果的影响,结果如图9所示。

表1 文丘里管结构参数

序号	入口锥角/°	出口锥角/°	喉部长度/mm	喉部直径/mm	入口直径/mm	出口直径/mm
1	20	30	8	5	20	20
2	30	30	8	5	20	20
3	40	30	8	5	20	20
4	50	30	8	5	20	20
5	60	30	8	5	20	20

由图9可看出当文丘里管出口锥角、喉部长度及喉部直径等其他结构参数不变的情况下,增大入口锥角,棉酚的脱除率也随之增大,图中数据显示,棉酚脱除率从27.7%增大到39.2%。这是由于随着文丘里管入口锥角的增大,收缩率增大,突收缩段导致压力迅速降低,空化数减小,汽含率增高,空化效果变剧烈,此结果与模拟结果相一致。表明本文设计的文丘里管空化装置通过空化作用在棉籽油预处理中对棉酚进行脱除实验可行,而且空化作用越强棉酚脱除效果越好。

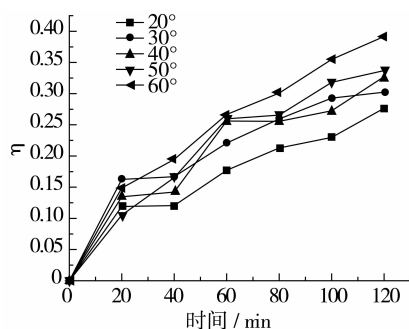


图9 入口锥角对棉籽油中棉酚降解的影响

4 结论

本文通过数值模拟与实验研究相结合的手段,以棉籽油为介质,对不同结构参数的文丘里管内空化流场的特性进行了数值模拟,并运用水力空化作用在棉籽油预处理中进行棉酚脱除实验,探究将空化作用应用于棉酚脱除的可行性。模拟结果表明,文丘里管结构参数的改变对管内空化效应有着非常重要的影响,空化效果的强度随着入口锥角的增大而增大,随喉部长度的增大而减小,与理论上喉部结构收缩扩张越显著空化效果越强相一致。模拟结果还表明,喉部直径和出口锥角对空化效应的影响存在一个最适值,在其他参数不变的情况下,喉部直径为5 mm,出口锥角30°时,空化效果最好。将水力空化应用于棉籽油预处理中棉酚脱除的实验结果表明,水力空化对棉籽油中的棉酚有明显的脱除作用,空化作用2 h可使棉酚脱除率达到39.2%,而且棉酚脱除率随着文丘里管入口锥角的增大而提高,亦即随着空化效应的增强而提高,实验结果与模拟结果相吻合,为今后水力空化应用于油脂的研究提供了可靠依据。

参考文献:

[1] GOGATE P R. Cavitation; an auxiliary technique in wastewater treatment schemes[J]. *Advances in Environmental Research*, 2002(6): 335-358.

[2] 管金发, 邓松圣, 张攀峰. 文丘里管空化装置设计与数值模拟

[J]. *后勤工程学院学报*, 2012, 28(3): 30-34.

[3] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Phil Magazine*, 1917, 34(1): 94-98.

[4] 贺成龙, 吴建华, 刘文莉. 空化应用研究进展综述[J]. *嘉兴学院学报*, 2008, 20(3): 57-62.

[5] 王智勇, 张晓冬, 杨会中. 文丘里管中空化流场的数值模拟[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(10): 939-942.

[6] 庄水田. 文丘里管的模拟优化及其实验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2009.

[7] BRAEUTIGAM P, WU Z L, STARK A, et al. Degradation of BTEX in aqueous solution by hydrodynamic cavitation[J]. *Chemical Engineering Technology*, 2009, 32(5): 745-753.

[8] WU Z L, ONDRUSCHKA B, BRAUTIGAM P. Degradation of chlorocarbons driven by hydrodynamic cavitation[J]. *Chemical Engineering Technology*, 2007, 30(5): 642-648.

[9] 张晓东, 李志义, 武君. 水力空化对化学反应的强化效应[J]. *化工学报*, 2005, 56(2): 262-265.

[10] SAMPATHKUMAR K, MOHOLKAR V S. Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(10): 2698-2711.

[11] ANHORN I B. Venturi Mixer; US 3507626[P]. 1970-04-21.

[12] ALUMUCK K M, GLCHAHINE G L. The use of Cavitating Jets to Oxidize Organic Compounds in Water[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(9): 465-470.

[13] LUSSI A, NUSSBACHER U, GROSREY J. A novel noninstrumented technique for Cleansing the root canal system[J]. *Journal of Endodontics*, 1993, 19(11): 549-553.

[14] 李虹霞. 超声空化防除垢与水力空化防除垢和强化传热实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.

[15] MADDIKERI G L, GOGATE P R, PANDIT A B. Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the transesterification of waste cooking oil[J]. *Fuel*, 2014, 137(1): 285-292.

[16] 王云, 俞云良, 陆向红. 水力空化技术强化酯交换反应合成生物柴油的研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2008, 36(1): 12-15.

[17] 何相君, 聂勇, 陆向红. 水力空化强化生制备物柴油过程的研究[J]. *精细石油化工进展*, 2011, 5: 47-51.

[18] 张昱. 水力空化及 CFD 数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.

[19] 张宇宁. 水力空化规律研究及其在油田污水处理上的应用[D]. 北京: 中国石油大学, 2007.

[20] 刘照东. 喷管流场水力空化的 CFD 数值模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.

[21] 付勇. 文丘里管内空泡动力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[22] 王常斌, 王敏, 于远洋. 文丘里管水力空化现象的 CFD 模拟[J]. *管道技术与设备*, 2013, 1: 10-12.

[23] 周芳梅, 冯志强, 李春荣. 高效液相色谱法测定酱油中的游离棉酚[J]. *中国食品添加剂*, 2015, 3: 184-190.

[24] 陈来. 游离棉酚的定量、定性研究及其对罗非鱼生长的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012. 完